

文章编号:1673-0062(2015)04-0109-05

FBG 传感器在 PHC 管桩水平载荷试验中的应用

周薛淼¹, 刘永^{1*}, 李国辉¹, 韩高彬²

(1. 南华大学核资源工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 中国水电基础局有限公司, 天津 301700)

摘要:介绍了 FBG 传感器的优点, 并说明了 FBG 传感器在 PHC 管桩中的安装工艺. 结合实际工程, 依据 PHC 管桩水平静载荷试验的监测结果, 分析了 PHC 管桩桩身内力与变形的分布规律: 在地面处, 桩身弯矩接近于零, 随着深度的增加, 桩身弯矩呈现先增加后减小的趋势, 其最大值在地面以下 (1/12 ~ 1/6) 桩长范围内发生, 其弯曲变形主要发生在桩体上部 1/3 桩长范围, 而距地面 1/3 桩长以下桩体几乎不发生弯曲变形; 桩身挠度随深度的增加逐渐减小, 最终减至零; 水平荷载对桩身弯矩及挠度均有显著的影响. 通过实验数据与理论计算结果的对比, 可知 FBG 传感器测试数据精确、可靠, 可较好的应用于 PHC 管桩的水平静载荷试验.

关键词:FBG 传感器; PHC 管桩; 水平载荷试验; 桩身内力; 变形

中图分类号:TU473 **文献标识码:**B

Application of FBG Sensing Technology in Lateral Load Tests on PHC Pipe Piles

ZHOU Xue-miao¹, LIU Yong^{1*}, LI Guo-hui¹, HAN Gao-bin²

(1. School of Nuclear Resources Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;

2. Sino Hydro Foundation Engineering Co., Ltd., Tianjin 301700, China)

Abstract: The advantage of the FBG sensor was introduced and the FBG sensors installation process in PHC pipe piles was also proposed. Combined with practical engineering, according to the monitoring results of PHC pipe pile lateral static load tests horizontal, PHC pipe pile body force and deformation was analysed after data processing: On the ground, pile bending moment was closed to zero. With the increase of depth, bending showed a trend of decrease after the first increase, and the maximum was (1/12 ~ 1/6) pile under the ground. The bending deformation was mainly distributed in the pile length above 1/3

收稿日期: 2015-06-13

基金项目: 环保部科研基金资助项目(监管 1409&1509)

作者简介: 周薛淼(1986-), 男, 安徽六安人, 南华大学核资源工程学院硕士研究生. 主要研究方向: 岩土边坡工程灾害预测与治理. * 通讯作者.

pile, and almost no deformation in the pile body below 1/3 pile; the deflection of the pile body decreases with increasing depth, and it was ultimately closed to zero; the horizontal load has significant impact on deflection of the pile body. Through comparing the experimental data with the theoretical calculation result, the testing data from the FBG sensor is reliable and could be better applied to the PHC pile lateral static load test.

key words: FBG sensors; PHC pipe pile; lateral static load tests; pile body internal force; deformation

0 引言

近年来,在中国内地,PHC管桩(高强预应力混凝土管桩)已被广泛的应用,特别适用于一些征地困难、建设期间短、施工过程中对环保要求又较高的工程,并以其具有承载能力高、质量稳定可靠、施工机械化程度高、对环境的影响小等特点受到青睐,但由于PHC管桩在实践中的应用还处于发展阶段,其工作性状的理论研究远远滞后于工程实践的需要,尤其是,对PHC管桩在水平荷载作用下性状的研究很不完善,使得PHC管桩的承载能力特别是水平承载力设计过于保守,不能充分发挥其作用,造成资源的极大浪费.因此,在管桩水平荷载试验中对桩身弯矩进行现场监测以获得管桩在水平荷载下的工作性能是提高设计水平的一条非常有价值的途径.

目前,光纤传感技术以光纤为传感和传输介质,不仅较易植入到结构体内或外表,还可以与监测结构体协调变形,在许多工程中得到广泛应用^[1-7].冯春等^[8]利用FBG(光纤Bragg光栅)传感器监测PHC桩的竖向静荷载试验,获得了桩身应变随竖向荷载的分布规律,但由于传感器存活率较低,导致研究结果不太理想.朴春德等^[9]将传感技术应用于钻孔灌注桩的竖向承载力监测,获得其桩身轴力及侧摩阻力分布规律,通过与并跟钢筋应力计的监测经过作对比,证明了光纤传感器在在钻孔灌注桩监测是可行的.为进一步提高PHC管桩在水平荷载作用下的工作性能,采用光纤传感技术,通过对试桩水平静荷载试验的监测,再经过数据处理,进而分析桩身弯矩、挠度的分布规律.

1 现场试验

1.1 试验场地条件与试验概况

试验场地所在地,地势平坦,地面高程一般在2.86 m~3.01 m之间,勘测最大孔深35 m,地基土基本参数划分如表1所示.

表1 土层基本参数表

Table 1 Soil parameters

土类	颜色	软硬	厚度/m	压缩模量 E_{s1-2}/MPa
素填土	褐黄色	可塑—硬塑	1.9~2.9	5.5
粉质粘土	灰色	硬塑	13~15.3	9.5
粉质粘土	灰色	可塑—硬塑	0.9~4.1	8.1
粉质粘土	褐灰色	可塑	6.3~10.8	8.5
粉质粘土 夹薄层粉土	褐灰色	硬塑	1.8~4.2	10.2

该次试验对4根PHC管桩进行了水平荷载试验,其标号分别为S1、S3、S5和S6.试验中在试桩同一深度的两侧分别对称安装传感器,其总数为68个,试验开始前测试初读数,存活传感器数量为65个,成活率为95.6%.限于篇幅,仅对S3试桩进行分析.S3试验桩桩径为400 mm,桩长为24 m.桩身两侧传感器位置分别位于桩身-1 m、-2 m、-3 m、-4 m、-5.9 m、-8 m、-17.5 m、-20 m、-22.6 m.本次试验桩顶高出地面50 cm,采用《建筑基桩检测技术规范》^[10]规定的方法进行测试,采用千斤顶施加水平力,水平力作用线经过地面标高处(与实际工程桩基承台面标高相同),在千斤顶与试桩接触处安装一球形铰座,以保证千斤顶作用力能水平通过桩身轴线.采用单向多循环荷载加载方式.一般取估计最大荷载的1/10~1/15,作为每级荷载的加载增量,本次试验首次加载为15 kN,每级荷载增量取15 kN.对每级施加荷载后,恒载5 min,进而测读其水平位移,然后使其荷载卸载至零,停2 min,再一次测读取其残余水平位移,至此完成一个加卸载循环.通过这种方式循环5次,即完成了一级荷载的测试试验.考虑到试验桩为工程桩,避免桩身破坏,要求桩身水平位移不得超过15 mm.传感器的读数通过光纤协调仪进行采集,然后进行数据处理.

1.2 FBG传感器的优势

为了保证内力测试传感器的成活率及精度,

本次试桩的应变测试采用光纤光栅应变传感器. 根据试桩勘探资料,在桩身选择某一深度处对称安装光栅应变传感器,并认为光栅传感器与混凝土是紧密地粘贴在一起的,它们同步变形,位移是连续的.因此,光栅传感器的应变即为混凝土管桩桩体的应变.FBG传感器的工作原理可参考文献[11],在传感网络应用中,它拥有十分明显的技术优势,主要包括:1)可靠性好、抗干扰能力强.因为光纤光栅对被测信息用波长进行编码,使其不受光源功率波动和光纤弯曲等因素引起的系统损耗的影响.2)测量精度高.精准的透射和反射特点(误差较小)使其更加确切的反映了应力和温度的变化.3)在单路光纤上能够制作多个光栅,可以用于大型工程分布式测量,其测量点多,测量范围大.4)传感头构造简单、尺寸较小,能够适应于不同的应用场合,特别适合于埋入材料内部,组成所谓的智能材料或结构.5)抗电磁干扰、抗腐蚀、能够在恶劣的化学环境下工作.

1.3 FBG传感器的安装工艺

FBG传感器的成活率将直接影响到PHC管桩在水平载荷作用下的工作性状的分析,其成活率越高,监测点越多,得到桩身的变形分析越精确,反之,成活率较低,则可能无法正确反映桩体在水平荷载作用下的工作性状.因此,在现场进行试验时,寻求合理且可靠的安装工艺,是提高传感器的成活率关键技术之一.本次测试的安装工艺如下:首先,在水平放置的桩体上表面弹线,标出安装传感器所需开槽的中心线及宽度,用手持式切割机沿放线指示切深度为12 mm的槽,然后用砂纸打磨,要求槽底面平滑,无突出棱角;同时将选好的传感器按照顺序连接起来,并放在设计深度平放到桩上,用记号笔标记出需要加宽、加深的部位及范围(主要是传感器及光纤接头部位).然后,用吹风机(图1a)及毛刷将切槽内及周边灰尘、碎石屑清除并用清洗液擦拭,为了避免在吊桩及打桩过程中光纤测线顶端的引出接头的损坏,在引出端桩体上打孔,将光纤引入桩体内部,测试时拉出读取数据(图1b、图1c).最后,将传感测线安置于切好的切槽内,连接解调仪进行一次数据测试,用现场配置好的灌密封胶把放置有传感器的切槽及空洞完全充填,进行封装(图1d),其具体粘贴方法如文献[12].注意,1)每一串传感器数量不宜太多(一般控制在10个以内).2)光栅传感器安装过程中必须轻拿轻放,避免折压,尽力避免其信号强度的损失,且应充分考虑到打桩过

程中的振动给光纤再来的影响.

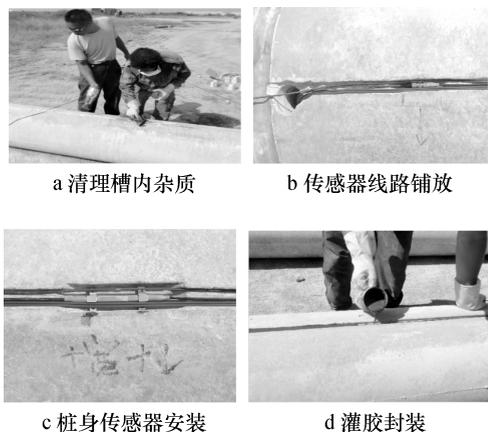


图1 传感器的安装过程

Fig.1 Process of installing sensors into piles

2 管桩监测结果分析

通过FBG传感器获取的数据,对其进行温度修正^[1],假定传感器与桩身紧密相连,其读数即桩体两侧的轴向应变,经整理换算成PHC管桩桩体的弯应变,并采用材料力学中的胡克定律换算成正应力,进而可以通过梁横截面任意一点的正应力与弯矩的相互关系^[13-14],即可获得PHC管桩桩体任意截面处的弯矩.本文通过测试结果并结合相关分析的数据统计方法,可得桩身弯矩如图2和图3所示.

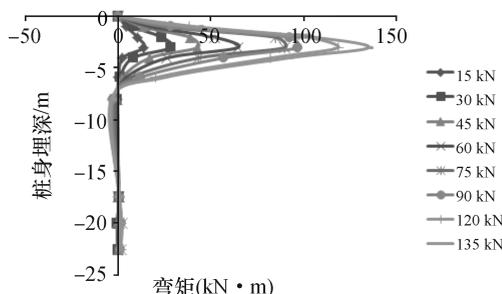


图2 S3桩身弯矩随桩身埋深的分布

Fig.2 Distribution of axial moment

图2分别反映了S3试桩弯矩随埋深在各级水平荷载作用下的分布规律:PHC管桩桩顶处弯矩为零,随着深度的增加,弯矩呈现先增加后减小的趋势,由于桩周土体的嵌固作用,至桩底时弯矩已经非常小,接近于零.桩身不同位置处弯矩是不相同的,且随着水平荷载的增加,同一位置处桩身弯矩值也在不断增加,弯矩最大值出现在距地面以下

(1/12 ~ 1/6) 桩长范围内, 桩顶以下 (1/6 ~ 1/3) 桩长范围内其值急剧减小, 在 1/3 桩长以下所有截面处的弯矩几乎为零, 表明距桩顶 1/3 桩长处为桩身临界嵌固点, 即 -8 m 以下为桩身的嵌固段. S3 在荷载加载到 135 kN 时, 其最大弯矩位于桩顶以下 3 m 的截面位置, 其值为 135.2 kNm.

根据参考文献[15]的计算方法, 可获得 PHC 管桩桩身的挠度分布分别如图 3 所示.

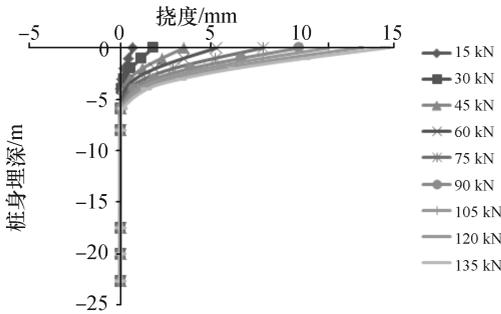


图 3 S3 桩身挠度随桩身埋深的分布
Fig. 3 Distribution of axial deflection

图 3 反映了桩身挠度随埋深的变化规律, PHC 管桩桩顶处的挠度最大, 然后逐渐减小, 在距地面 1/3 桩长以下, 桩身挠度也接近于零, 也说明该次水平荷载试验的影响范围主要在距桩顶 1/3 桩长以内的桩体. S3 试桩在荷载加载到 135 kN 时, 其最大挠度为 14.57 mm.

3 对比分析

表 2 展现了水平荷载分别为 15 kN、75 kN、135 kN 时, 埋深为 0.5 m、1.5 m、2.5 m、3.5 m 处桩身弯矩理论值与实测值关系.

表 2 S3 桩弯矩理论值与实测值比较
Table 2 Comparison between the theoretical and measured value

载荷/kN	不同位置处的弯矩/(kN * m)				
	-0.5	-1.5	-2.5	-3.5	
15	实测	6.2	11.5	13.18	2.4
	理论	6.97	13.0	11.92	2.81
	误差	-11%	-12%	10%	-15%
75	实测	25.4	75.1	90	43.3
	理论	34.87	65.01	74.6	44.6
	误差	-27%	16%	21%	-3%
135	实测	51.3	106	135.2	92
	理论	62.8	117.01	130.17	80.2
	误差	-18%	-9%	4%	15%

从表 2 可以看出, 虽然监测点在水平力作用下实测值和理论值有一定的误差, 其最大值达 27%, 同时满足《建筑基桩检测技术规范》最低技术要求, 但也考虑到 FBG 传感器的安置、千斤顶加载、仪器本身的测试误差以及理论计算不完善等因素的影响, 进而可以认为实验数据可靠的、正确的, 同时精度也是能够满足工程的要求, 也证明了该监测方法的合理性.

4 结论

1) 本文通过和实际工程的现场载荷试验相结合, 成功的把 FBG 传感技术应用于混凝土管桩的水平静载荷试验中, 进而提出有效的传感器埋设工艺, 使得传感器成活率超过了 95%, 数据测试的可靠性、精度性都满足与实际工程的要求, 为未来的应用积累了宝贵的经验.

2) 该试验中 PHC 管桩桩身弯矩在地面处接近于零, 且随着埋深的增加, 呈现先增加后减小的趋势, 弯矩最大值出现在距地面以下 (1/12 ~ 1/6) 桩长的范围内, 桩身弯矩急剧减小段位于地面以下 (1/6 ~ 1/3) 桩长范围内, 且在距地面 1/3 桩长以下均为管桩的嵌固段.

3) 管桩桩身挠度在地面处的值最大, 随埋深的增加而减小, 且在距地面 1/3 桩长以下接近于零. 相同的桩径条件下, 桩顶挠度随着水平荷载的增加而增大.

参考文献:

- [1] 李世海, 魏作安, 张俊红, 等. 光纤光栅传感技术在抗滑桩模型实验中的应用[J]. 传感器与微系统, 2006, 25(3): 84-85, 88.
- [2] 李焕强, 孙红月, 刘永莉, 等. 光纤传感技术在边坡模型试验中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1703-1708.
- [3] 董建华, 谢和平, 张林, 等. 光纤光栅传感器在重力坝结构模型试验中的应用[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, 41(1): 41-46.
- [4] Chan T H T, Yu L, Tam H Y, et al. Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: background and experimental observation [J]. Engineering Structures, 2006, 28(5): 648-659.
- [5] 申昊文, 朱萍玉, 许沛胜, 等. 基底刻槽封装式光纤光栅传感器应变传递影响因素分析[J]. 仪表技术与传感器, 2015(2): 96-99.



图5 爆破效果图

Fig.5 Blasting effect diagram

2)对于倒塌条件比较苛刻的情况下,在满足支撑重量的情况下,开设人工定向窗和导向窗尤为关键,对烟囱沿预定倒塌中心线倾倒是具有十分重要的影响。

3)在烟囱爆破拆除时,要清除干净烟囱内部的粉煤灰层,以免爆破时影响烟囱的整体倒塌方向的准确性。同时对满足安全条件的烟囱结构要提前进行预处理,尤其对于内衬比较厚的烟囱,通过人工预拆除后,不但减少了钻爆量,而且保证了烟囱倒塌的可靠性。

参考文献:

[1] 刘国军. 复杂环境下50 m 高砖结构烟囱爆破拆除[J]. 爆破,2010,27(3):70-72.

[2] 王江平,王仕文,房泽法. 复杂环境下银海大厦定向爆破拆除[J]. 工程爆破,2013,19(4):38-41.

[3] 袁岳琪,周洪文,刘红,等. 复杂环境下65m 高砖结构烟囱定向爆破拆除[J]. 爆破,2012,29(1):81-83.

[4] 夏卫国,袁平,武双章,等. 复杂环境下两座烟囱交叉定向爆破拆除[J]. 爆破器材,2015,44(1):50-54.

[5] 汪旭光. 爆破设计与施工[M]. 北京:冶金工业出版社,2012:419-421.

[6] 马红卫,刘鹏虎,郑建礼. 电厂烟囱及主厂房控制爆破拆除[J]. 工程爆破,2011,17(3):69-73.

[7] 齐宪秀,张义平,池恩安,等. 复杂条件下4座烟囱拆除爆破[J]. 爆破,2010,27(3):64-66.

[8] 王希之,谢兴博,谭雪刚,等. 210m 高烟囱爆破拆除技术[J]. 工程爆破,2011,17(2):53-55.

[9] 王中立. 复杂环境下爆破拆除砖结构烟囱[J]. 铁道建筑技术,2014(1):108-111.

[10] 袁绍国. 复杂环境下冷却塔定向倾倒爆破[J]. 爆破,2006,23(4):49-52.

[11] 张小强,齐世福,张耀良,等. 镇江6栋楼房控制爆破拆除[J]. 爆破,2011,28(3):71-73,79.

[12] 冯叔瑜. 城市控制爆破[M]. 北京:冶金工业出版社,2000:247-248.

[13] GB 6722—2003 爆破安全规程[S]. 北京:中国标准出版社,2004.

[14] 周家汉. 爆破拆除塌落振动速度计算公式的讨论[J]. 工程爆破,2009,26(1):1-4.

[15] 汪旭光,于亚伦. 拆除爆破理论与工程实例[M]. 北京:人民交通出版社,2008:124-130.

(上接第112页)

[6] 蒋晓曙,李莽,任亮,等. 光纤光栅传感器在混凝土变形及裂缝监测中的应用[J]. 施工技术,2013,42(4):52-54.

[7] 苏军,王治宇,袁子清,等. 光纤光栅(FBG)传感器在尾矿库在线监测中的应用[J]. 中国安全生产科学技术,2014,10(7):65-70.

[8] 冯春,李世海,刘天革,等. 光纤光栅传感系统在打入桩中的埋设工艺试验研究[J]. 传感器与微系统,2009,28(9):12-15.

[9] 朴春德,施斌,魏广庆,等. 分布式光纤传感技术在钻孔灌注桩检测中的应用[J]. 岩土工程学报,2008,30(7):976-981.

[10] JGJ 106-2003 建筑基桩检测技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.

[11] 朱鸿鹄,殷建华,靳伟,等. 基于光纤光栅传感技术的地基基础健康监测研究[J]. 土木工程学报,2010,43(6):109-115.

[12] 许利凯,韩高彬,侯岳峰. PHC管桩试桩应力、应变检测的方法:中国,201210476519[P]. 2013-02-20.

[13] 杨克己,韩理安. 桩基工程[M]. 北京:人民交通出版社,1992.

[14] Li M Q,Zeng N,Shi C Z,et al. Fiber Bragg grating distributed strain sensing an adaptive simulated annealing algorithm approach[J]. Optics&Laser technology,2005,37(7):454-457.

[15] 陈祥,孙进忠,蔡新滨. 基桩水平静载试验及内力及变形分析[J]. 岩土力学,2010,31(3):753-759.